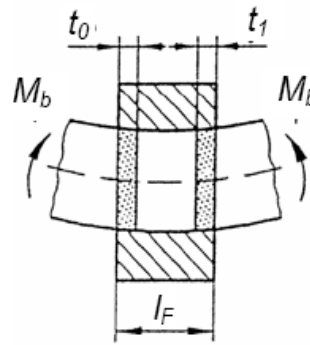


## Gestaltung und Dimensionierung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen

Hilgermann, J. L.; Lütkepohl, A.

*Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen dar. Geringe Fertigungstoleranzen und die gleichzeitige Integration des Leichtbauprinzips ermöglichen eine ökonomische und ökologische Fertigung. Der niedrige Wissensstand und fehlende Auslegungsvorschriften innenhochdruckgefügter Pressverbindungen erlauben den Einsatz dieser Verbindungstechnologie nur nach umfangreichen experimentellen Untersuchungen. Derzeitige Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenwesen haben die Erarbeitung konstruktiver Grundlagen und Aussagen zur Betriebsfestigkeit Innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen zum Ziel.*



*Inside-High-Pressure Joining-Technology makes up an interesting and innovating alternative to the classical Joining-Technologies. Little manufacturing tolerance and the integration of lightweight construction make an economically and ecologically manufacturing possible. Little knowledge and missing dimensioning rules allow the use of such technology after only after extensively testing. Current research at the Institute of mechanical Engineering has the ambition to create dimensioning rules and to predict the lifetime of Inside-High-Pressure joined shaft to collar connections.*

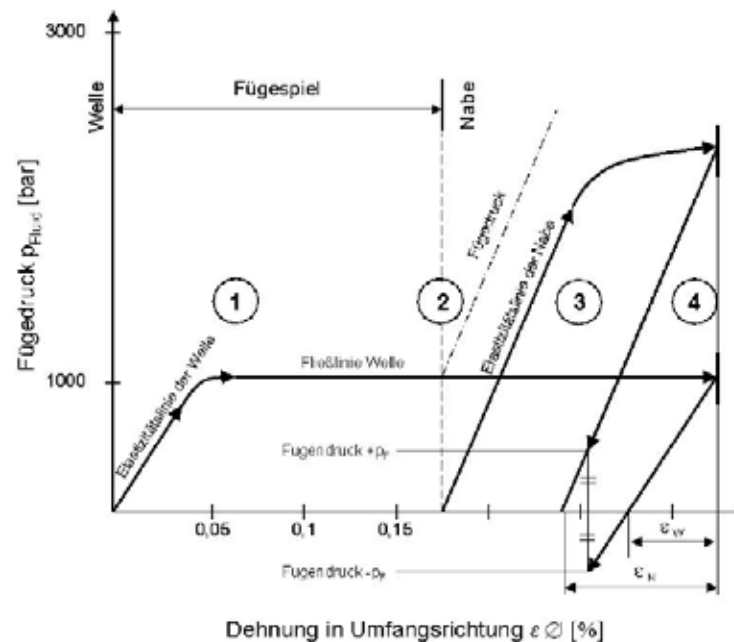
### 1 Einleitung

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen im Bereich der Antriebstechnik dar. Solche Verbindungen werden zurzeit im Bereich der Massenfertigung im Automobilbau an Nocken- und Steuerwelle realisiert, die Tragfähigkeiten werden dabei empirisch auf den Anwendungsfall hin erprobt. Das Potential dieser wirtschaftlich interessanten und auf Leichtbau ausgerichteten Verbindungstechnik umfasst aber mindestens die gesamte Antriebstechnik des Maschinen-, Fahrzeug- und Apparatebaus. Bisher fehlt jedoch eine verlässliche Methode zur Auslegung und zum Tragfähigkeitsnachweis unter statischen und dynamischen Beanspruchungen.

Das Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal untersucht derzeit das Verhalten innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter dynamischen Lasten (Torsion und Umlaufbiegung). Ziel ist die Ermittlung einer Tragfähigkeits-Grenzlast, bis zu der ein schadensfreier Einsatz in der Praxis möglich ist. Kenntnisse über Steigerungspotenziale der Tragfähigkeit sowie die mathematisch-physikalischen Zusammenhänge sollen erarbeitet und das Verhalten der Verbindung unter konstruktiven und werkstoffmechanischen Einflüssen untersucht werden.

## 2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

Das Prinzip des Innenhochdruckfügens (IHF) ist der Technologie des Innenhochdruckumformen (IHU) sehr ähnlich. Im Gegensatz zum IHU, bei dem beispielsweise ein Rohr gegen eine Werkzeugwand expandiert wird und einen Körper mit komplizierter Geometrie ergibt, werden beim IHF Welle und Nabe kraftschlüssig miteinander verbunden. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet.

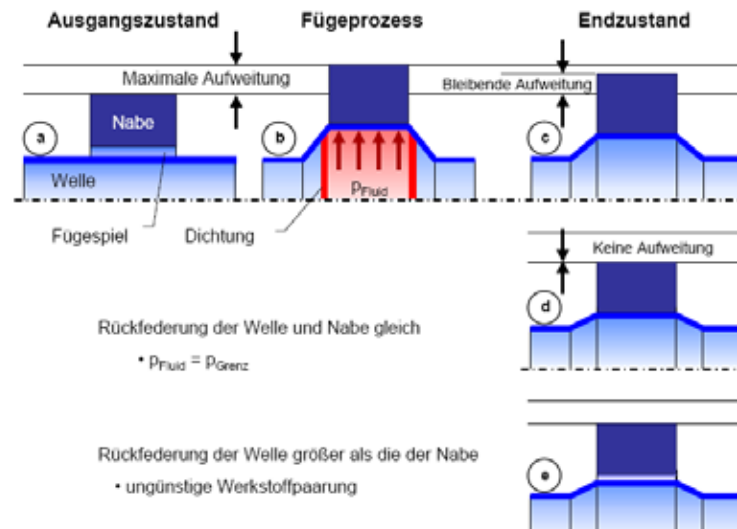


**Bild 1:** Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens, /1/

Das Aufweitewerkzeug wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die sich auf der Sonde befindlichen Dichtungen mit einem genau

definierten Drucküberstand seitlich der Nabenränder abschließen. Dieser im Rohr genau abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt. Dieses Medium gelangt durch eine Sondenbohrung in den Ringspalt. /1/

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch auf, **Bild 1-1**. Nachdem das Fügenspiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren, **Bild 1-2**. Bei weiterer Drucksteigerung und durch gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die Nabe elastisch oder teilplastisch verformt, **Bild 1-3**. Nach dem Erreichen des max. Fügedrucks und Halten des Drucks für einen bestimmten Zeitraum erfolgt die vollständige Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, **Bild 1-4**. /1/



**Bild 2:** Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände, /1/

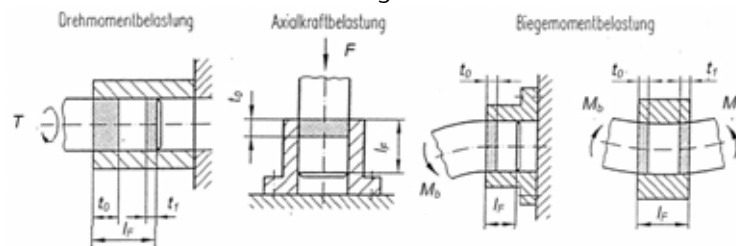
Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund der Festigkeitsunterschiede der Fügepartner ergibt sich ein unterschiedliches Rückfederungspotential, das dazu führt, dass sich die Nabe auf die Welle „schrumpft“. Die Rückfederungsbehinderung, verursacht durch die plastifizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung, **Bild 2-c**. Es ergibt sich ein Eigenspannungszustand ähnlich dem eines Pressverbandes oder nach einer Autofrettage, der das Rohr in der Bohrung festhält. Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als

das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht ausbilden, **Bild 2-e**. Den Grenzzustand bei dem die Rückfederung der Nabe gleich der Rückfederung der Welle ist, wird in **Bild 2-d** dargestellt. Hier liegt ein Zustand vor, der mindestens erreicht werden muss, damit sich ein Presssitz bei Überschreitung des Grenzfugedruckes einstellt. Bei der analytischen Betrachtung der Verbindung ist dieser „Grenzzustand“ von besonderer Bedeutung. /1/

### 3 Schädigungsmechanismen

Die Drehmomentein- bzw. -ausleitung im vorderen Teil der Pressverbindung bewirkt eine unterschiedliche Verdrillung, die schon bei relativ geringer Drehmomentbelastung zur Überschreitung der maximalen Reibschubspannung und damit zu einer Relativbewegung (Schlupf) führt.

Die Bereiche einer Pressverbindung, in denen eine Relativbewegung (Schlupf) zwischen Welle und Nabe unter Flächenpressung stattfindet, bezeichnet Groppe als Gleitzonen. Zur Ausbildung dieser Bereiche ist insbesondere der Kraftfluss maßgeblich verantwortlich. /3/



**Bild 3:** Pressverbindungen mit Gleitzonen bei Drehmoment-, Axialkraft- und Biegemomentbelastung (prinzipielle Darstellung), /3/

In diesen Gleitzonen führt die Relativbewegung bzw. das Aufeinanderreiben der Fügepartner unter Flächenpressung und dynamischer Beanspruchung zum Schwingungsverschleiß und schädigt das Bauteil durch Reibkorrosion. Obwohl in zahlreichen Forschungsvorhaben die besondere Bedeutung der Flächenpressung und des Schlupfes untersucht wurden, fehlen für unter Innendruck gefügten Welle-Nabe-Verbindungen gesicherte Erkenntnisse über die qualitative Wirkung der Flächenpressung und den so genannten tribologisch unschädlichen Schlupf.

/4/, /5/ und /6/ beschreiben auf Basis grundlegender Untersuchungen zum Thema Reibdauerbruch, dass sowohl die Flächenpressung als auch der Schlupf einen relevanten Einfluss auf den Schwingverschleiß haben.

Unter dynamischer Belastung mit örtlichem Wechselgleiten verringern sich, mit zunehmender Lastwechselzahl, die Größen der Gleitzone, der Gleitwege und die Gleitarbeit. Mit dieser Verringerung ist eine Erhöhung der Übertragungsfähigkeit, dem so genannten Hochtrainieren, verbunden.

Bei trocken sowie bei mit Ölen bzw. Schmierstoffen gefügten Pressverbindungen bildet sich, bei einer dynamischen Belastung mit örtlichem Wechselgleiten entsprechender Größe, Passungsrost, welcher meist einen Anriss in der Welle zur Folge hat. Typisch für einen Reibdauerbruch ist, dass der Riss nicht direkt unterhalb der Nabe, sondern im geringen Abstand von der Nabenkante in der Gleitzone beginnt. Bei trocken gefügten Pressverbindungen tritt dies schneller auf als bei den mit Schmierstoffen gefügten Verbindungen.

#### **4 Untersuchungen am IMW**

Experimentelle und theoretische Untersuchungen haben die Erarbeitung konstruktiver Grundlagen zur besseren Beherrschung des Reibrostproblems und eine Aussage zur Betriebsfestigkeit Innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen zum Ziel.

Finite Elemente Berechnungen definieren die Grenzbelastung zur Vermeidung von Reibkorrosion unter Torsion durch Bestimmung des Schlupfes. Hierbei sollen nicht nur die Reibkoeffizienten sondern auch die Oberflächenbeschaffenheit der Welle und der Nabe sowie deren chemisch-physikalisch-mechanischen Wechselwirkungen in das Modell integriert werden. Die ermittelten Ergebnisse werden an experimentellen Versuchen überprüft und das FE-Modell gegebenenfalls nachkalibriert. Weiterführende experimentelle Untersuchungen stützen die Simulation und geben gleichzeitig Aufschluss über die zu erwartende Streuung der Ergebnisse.

In einem weiteren Arbeitsschritt werden FE-Simulationen zum Verhalten innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter statischer Querkraftbiegung durchgeführt. Anders als bei Torsionsbelastung ist bei Querkraftbiegebelastung eine Relativbewegung von Welle und Nabe in axialer Richtung zu erwarten. Auch hier dienen experimentelle Untersuchungen zur Kalibrierung und Verifikation des FE-Modells, und geben Aufschluss über die zu erwartenden Streuung der Ergebnisse.

In einem letzten Schritt werden innenhochdruckgefügte Welle-Nabe-Verbindungen experimentell unter umlaufender Querkraft-Biegebelastung untersucht. Sie sollen die tribologischen Auswirkungen dieser Belastungsart aufzeigen und eine Aussage zur Grenzbelastung ermöglichen.

## **5 Zusammenfassung**

Innenhochdruckgefügte Pressverbindungen stellen eine interessante und innovative Alternative zu klassischen Pressverbindungen dar. Fehlende Auslegungsvorschriften verhindern den zahlreichen Einsatz dieser Füge-technologie. Umfangreiche theoretische sowie experimentelle Forschungsarbeiten am Institut für Maschinenwesen haben das Ziel, wichtige Auslegungs- und Gestaltungsprinzipien sowie Aussagen zum Betriebsfestigkeitsverhalten zu erarbeiten. Umfangreiche FE-Simulationen werden maßgeblich für die Untersuchungen eingesetzt und schaffen ein fundiertes mathematisch-physikalisch-mechanisches Verständnis der Vorgänge unter Last.

## **6 Literatur**

- /1/ Grünendick, T.: Experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefügtten Wellen. IMW - Institutsmitteilung Nr. 28, Clausthal 2003
- /2/ Grünendick, T.: Die Berechnung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen. Papierflieger, Clausthal 2005, ISBN: 3-89720-795-8
- /3/ Gropp, H.: Klose, D.: Grundlegende Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Übertragungsverhalten dynamisch belasteter Pressverbindungen. VDI Berichte 1384, VDI-Tagung in Fulda, 28./29. April 1998, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- /4/ Funk, W.: Der Einfluss der Reibkorrosion auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenelemente. Dissertation, TH Darmstadt, 1968
- /5/ Julius, A.: Reibkorrosion – Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs. FKM-Forschungsheft 18, 1972
- /6/ Kreitner, L.: Die Auswirkungen von Reibkorrosion und Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile. Dissertation, TH Darmstadt, 1976